通过两极球形磁体实验解释单极感应问题

张学亮[1]
[1]（芜湖职业技术学院电气与自动化学院 安徽芜湖 241000）

摘要：分析指出单极感应磁体磁力线相对于转轴的全对称分布状态没有被引起足够的重视，是导致单极感应问题产生和遗留的根本原因。提出了一种两极球形磁体验证单极感应问题的方案。方案实施容易。只要选择合适的转轴取向，同一磁体既可以实施经典的单极感应，又可以实施找寻单极感应问题答案的两极感应验证实验。两种实验步骤对应实施，实验结果可对比分析。与单极感应全部实验结果两种观点都可以给出合理的解释不同，两极感应验证实验时磁体的磁力线相对于转轴的分布已不再是全对称状态，因此对于验证结果两种观点能给出的合理解释差异凸显出来，对与错已显现。验证结论是：磁体的磁力线随磁体运动。
关键词：单极感应；磁力线；分布；球形磁体；两极感应
分类号：0441

Explaining Unipolar Induction via Bipolar Induction Experiments with a Spherical Magnet

Zhang Xueliang
(Institute of Electrical and Automation, Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241000, China)

Abstract: This paper highlights the overlooked factor contributing to the unipolar induction paradox, which is the lack of attention to the fully symmetrical distribution of magnetic field relative to rotation axis in the experimental setup. To address this, the paper proposes a set of bipolar induction experiments using a spherical magnet to explain unipolar induction. The proposed experiment is easy to implement --- we can perform both the classic unipolar induction and the bipolar induction experiments by selecting different orientation of the rotation axis with the same magnet. The two sets of experiments can be conducted following their respective procedures, and the results can be conveniently compared and analysed. In contrast to the unipolar case where both viewpoints provide reasonable explanations for all results, the difference between the explanations given by the two viewpoints becomes apparent in the bipolar induction settings. This is due to the distribution of magnetic field lines in the magnet relative to the rotational axis no longer being fully symmetrical. Such differences between the two viewpoints in the asymmetric settings allow us to verify their correctness. Our analysis shows that magnetic field lines move with the magnet.

Keywords: Unipolar induction; Distribution of magnetic field lines; Spherical magnet; Bipolar induction

单极感应是法拉第当年做的一个电磁感应实验，产生了一个著名的“磁体的磁力线是否随磁体运动”的问题，又称单级感应问题。该问题至今还没有明确的答案。经典的单极感应实验原理由图 1 所示。图中 M 为圆柱形导电磁体；Z 为转轴。测量导线 L 中先串接电流计

G，再通过滑动触点 a 和 b 与导电磁体 M 连接构成测量回路。当圆柱形磁体以恒定角速度ω绕转轴中线旋转时，电流计 G 显示有稳定的直流电流，说明测量回路中有感应的直流电动势。针对电动势产生于测量回路的哪个部位，导致了两种不同的观点。一种观点认为磁力线是静止的，电动势是由磁体表面 ab 段导体切割静止的磁力线产生的（下文简称 s 观点）。另一种观点认为磁力线随磁体运动，电动势是由线段 L 切割随磁体运动的磁力线产生的（下文简称为 m 观点）。两种观点对实验观察结果的解释都很合理，分不清谁对谁错。为了寻找问题的答案，人们花费了许多时间和精力。由于长期没有结果，导致人们失去耐心，开始把单级感应问题神秘化、玄虚化了，甚至还断言单极感应问题的答案没有意义。表面上看单极感应问题只是磁力线是否随磁体运动的问题，实际上它牵扯到的东西并不简单。只要注意到该问题是人们开始对电磁领域进行系统探索的最初阶段遇到的问题，是电磁学的最基础的问题。从爱因斯坦的“论动体的电动力学”论文开篇内容及其相关论述不难看出，单极感应问题实际上已经直接或间接地影响了近代物理学的发展轨迹，所以该问题答案的重要性是不言而喻的。希望本文介绍的验证方案与验证结果能够给出单极感应问题的答案。

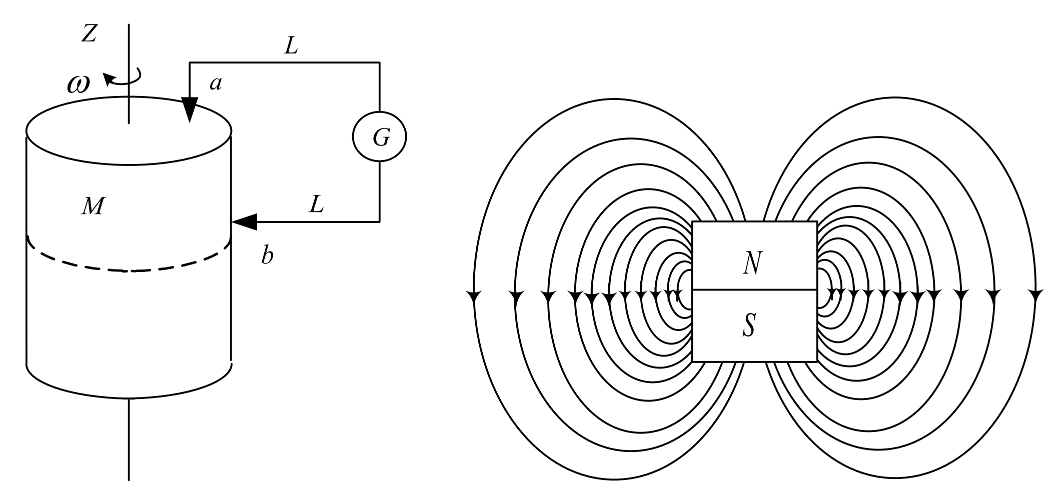


图 1　圆柱形磁体单极感应原理示意图　图 2　圆柱形磁体沿转轴中线剖面的磁体外围磁力线分布示意图

Fig. 1 Unipolar induction experiment with a cylindrical magnet

Fig. 2 The section view of the magnetic field line distribution around the cylindrical magnet (cut open along the rotation axis)

1　单极感应问题的产生与至今无解的原因

图 2 给出了圆柱形磁体沿转轴中线剖开的磁体外围主磁力线(忽略了对电磁感应几乎没有影响的漏磁）分布示意图。由图 2 和图 1 不难看出，闭合的磁力线构成磁力线平面，同一个磁力线平面上分布着一圈圈大环套小环由磁体表面向外延伸的闭合磁力线。磁力线平面与转轴中线处在同一平面上,并以转轴中线为对称轴四周均匀对称分布，并且这种分布状态在磁体旋转时也不会改变。下文把这种分布状态简称为全对称分布。若假定图 1 中磁体静止，磁体上的 a、b 两触点在各自纬线上与测量导线 L 一同环绕磁体一周（相当于 m 观点磁体旋转一周），设线段 L 切割磁力线的净数量(指能够产生电动势的有效切割。切割方向相反、数量相同的磁力线因相互抵消所以无效。）为 n，由于磁体磁力线的全对称分布，磁力线又

是闭合线，所以 n 的大小只取决于 a、b 两触点在磁体上的纬线位置，与线段 L 的长短、是否靠近或远离磁体（即线段 L 与磁体的相对位置）是无关的。所以在单极感应实验时，只要 a、b 两滑动触点在磁体表面的位置确定并保持不变，则 a、b 两点范围内所包含的净磁力线数量就确定了，当磁体以恒定角速度ω旋转时，无论是 s 观点还是 m 观点得到的单位时间内切割磁力线的净数量，或者说测量回路中的感应电动势是完全相同的，与线段 L 的长短、是否靠近或远离磁体无关；（实验过程中线段 L 相对于磁体的位置变动不会对感应电动势产生影响，因此电流计的显示结果不会改变。）两种观点判别的感应电动势方向在测量回路中也是相同的；并且两种观点也很容易得出相同的测量回路中的感应电动势 E：

$$E = \int_a^b (V \times B) \bullet d\,l \qquad (1)$$

式中的积分线段 ab 对于 s 观点来说是磁体表面 a、b 两点的距离，对于 m 观点来说就是线段 L 理论上的最短积分长度。式中的其它参量两种观点的定义是相同的。V：线元$d\,l$ 相对于磁力线的线速度；B：磁体表面 a、b 连线段的平均磁感应强度。

可见实验磁体的磁力线全对称分布状态，导致了 s、m 两种观点都能够合理的解释实验观察结果，是单极感应问题的产生根本原因。人们后来验证实验所采用的磁体无论是永磁体、直流电磁铁或交流电磁铁，由于实验过程中磁体的磁力线也基本上都是全对称分布状态，因此无法验证出问题的答案。还有的验证方案由于装置过于复杂、抗干扰能力差、实施困难，导致其验证结果的可靠性不能令人信服。或许正是实验过程中测量线段 L 相对于实验磁体的位置变动对测量显示结果没有影响，导致了人们没有仔细关注、分析实验磁体磁力线的分布状态，导致了问题的遗留。所以验证实验应避免磁体的磁力线全对称分布状态。

单极感应磁体旋转时在同一纬线上旋转的只有一个磁极，如果改为两极或更多磁极，磁力线的分布状态就不同了。在两极或多极感应实验过程中，测量线段 L 相对于磁体位置的改变是否影响显示观察结果，显然对验证结果至关重要。本文选择两极球形导电永磁体的验证方案进行介绍，是因为两极球形磁体结构简单，方案实施容易，更主要的是只要改变转轴取向，这种磁体既可以实施经典的单极感应实验，也可以实施两极感应的验证实验，方便实验结果的对比分析。

2 两极球形导电磁体再现经典单极感应

球形磁体单极感应实验原理见图 3。图中 M 为二级球形导电永磁体。单极感应对球形磁体的转轴取向要求是：转轴中线与球心和两个磁极顶点的连线重合。这时球形磁体的磁力线相对于转轴的分布为全对称状态，转轴中线与磁力线平面位于同一平面。图 4 是球形磁体沿转轴中线剖开的磁体外围磁力线分布示意图。图 3 中测量线段 L 中串接电流计 G，再通过 a、b 两滑动触点与磁体表面 ab 段导体连接构成测量回路。图中虚线表示赤道中线位置，也是 N 与 S 磁极交界面的位置。实验过程中实验磁体的旋转角速度为ω（约 240π/秒）。实验步骤、观察结果以及两种观点对观察结果的解释如下：

（1）当 a、b 两滑动触点位于同一纬线上，或分别位于与赤道中线上、下距离相等的纬线上。线段 L 静止，磁体旋转时电流计 G 显示为零。

s 观点解释：磁体表面 ab 段导体单位时间内切割的磁力线净数量为零，故测量回路中

感应电动势为零。

m 观点解释：相对于实验室静止的线段 L 单位时间内切割的磁力线净数量为零，故测量回路中感应电动势为零。

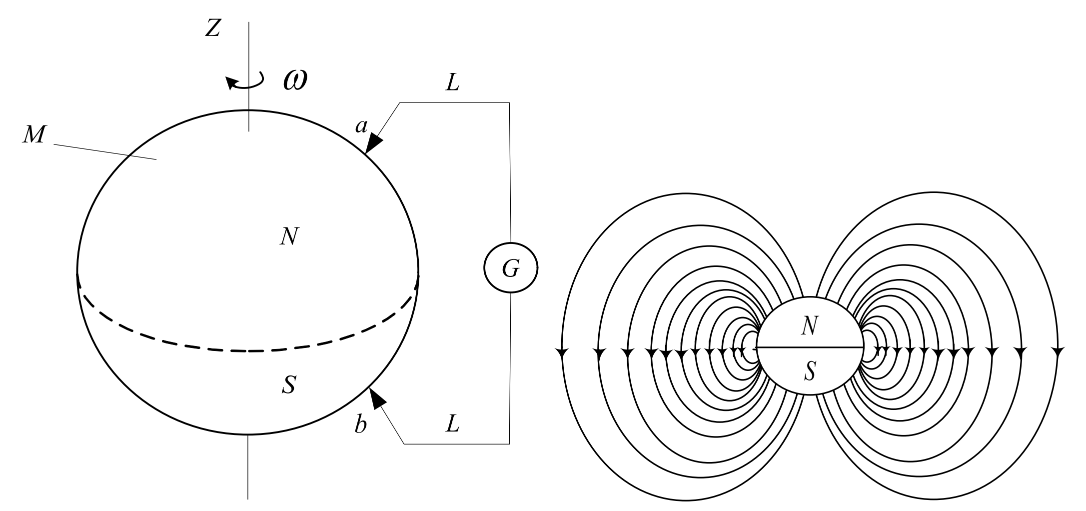


图 3　两极球形磁体单极感应原理示意图　　图 4　球形磁体沿转轴中线剖开的磁体外围磁力线分布图

Fig. 3 Unipolar induction experiment with a bipolar spherical magnet

Fig. 4 The section view of the magnetic field line distribution around the spherical magnet (cut open along the rotation axis)

（2）除了（1）所列的特殊位置外，只要 a、b 两触点不在同一纬线上。L 静止，磁体旋转时电流计 G 显示有直流电流，电流数值随纬线距离的增大而增大。当两触点分别位于赤道中线与转轴位置时，显示电流最大。若将位于转轴的触点移至另一端转轴，则电流方向变反。

s 观点：a、b 两点的纬线距离拉开，磁体上 ab 段导体单位时间内切割磁力线的净数量不为零，所以测量回路中感应有直流电动势，电流计有显示。当两触点分别位于赤道中线和转轴位置时，磁体由 N 极出发再回到 S 极的所有磁力线都会被切割到，因此单位时间内被切割的磁力线净数量最多，感应电动势最大，电流最大。这时若将位于转轴的触点移至另一端转轴，被切割的磁力线方向变反，感应的电动势方向也变反。

m 观点：是线段 L 切割磁力线感应了电动势。其他的解释与 s 观点相同。

（3）磁体旋转时移动测量线段 L，L 靠近或远离磁体时对电流计显示结果没有影响。

s 观点：由于测量回路中的电动势是由磁体上 ab 段导体贡献的，所以磁体外的线段 L 相对于磁体位置的变化对测量回路中的感应电动势不会产生影响。

m 观点：因磁力线相对于转轴全对称分布，磁体的旋转方向与角速度恒定，由上面的分析可知，线段 L 上感应的电动势大小只取决于 a、b 两点在磁体上的位置，与线段 L 的长短、相对于磁体的位置无关。所以移动线段 L 对电流计显示结果没有影响。

还可以列出更多步骤的实验，如磁体静止线段 L 环绕磁体旋转，结果会产生电动势，

或磁体与线段 L 同步旋转，结果不产生电动势。总之单极感应所有步骤的实验结果两种观点都可以给出十分合理的解释。

3　球形导电磁体两极感应验证实验

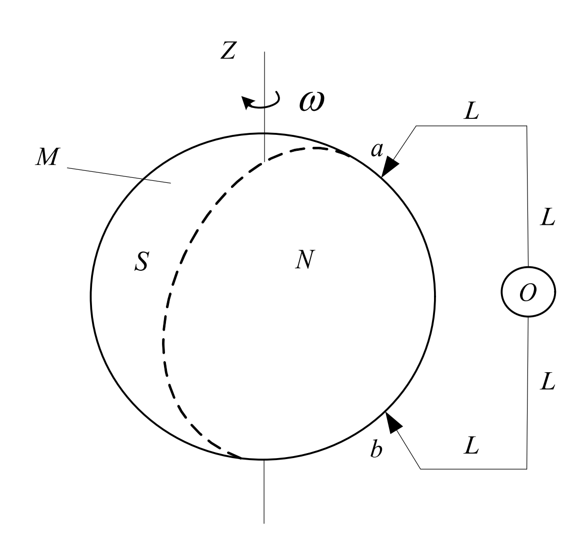


图 5　两极球形磁体验证实验原理示意图

Fig. 5 Bipolar induction experiment with a spherical magnet

两极球形导电磁体验证实验原理见图 5。两极感应验证实验磁体的转轴取向是：将图 3 的实验磁体转轴以球心为圆心旋转 90 度，即转轴中线过球心并与 N、S 两磁极的交界面重合。两极感应验证实验磁体旋转时在同一纬线上旋转的是两个磁极，所以称之为两极感应。两极感应产生的是电动势为交流电动势，所以图 5 中线段 L 串接的是示波器 O，可以更直观地观察测量回路中感应的交流电动势。由图 4 可知，球形磁体磁力线在磁极交界面两边对称分布（磁力线的方向相反），由大圈套小圈构成的磁力线平面与磁极交界面垂直，与磁极交界面的半径延长线重合。在图 3 的单极感应转轴取向时，磁力线平面与转轴中线及经线位于同一平面，磁极交界面与赤道面重合，磁体外围磁力线相对于转轴中线为全对称分布。所以实验过程中线段 L 的位置相对于磁体变化不会对测量回路中的感应电动势产生影响。但在图 5 两极感应转轴取向时，原来两边磁力线对称分布的赤道中线（磁极交界面的圆周线）变成了一个经线圈，磁力线平面与转轴中线变成了垂直关系，磁体外围磁力线相对于转轴的分布已不再是全对称状态。图 6 给出了图 5 实验磁体沿转轴中线（也是磁极交界面）剖开的磁体外围磁力线分布示意图。图中长箭头代表磁力线平面。箭头由磁体向外由粗到细表示磁力线密度的变化由密到稀。在图 5 转轴取向状态下，再假定磁体静止，磁体上的 a、b 两触点在各自纬线上与测量导线 L 一同环绕磁体一周，显然与图 3 的情况不同，线段 L 靠近或远离磁体切割的磁力线净数量是不同的。L 越靠近磁体被切割的磁力线就越多，离磁体越远被切割的磁力线就越少。所以图 5 中的实验磁体旋转时，如果改变线段 L 相对于磁体的位置也对显示结果没有影响的话，就可以直接判定 m 观点是错误的。但实际验证结果正相反，并且出现了有些步骤的实验观察结果只用一种观点才能给出合理解释，另一种观点即使引入

法拉第电磁感应定律的协助（因为感应的是交流电动势，可以引入法拉第电磁感应定律的解释。）也无法给出合理的解释。下面列出的是几组相关步骤的验证实验。为了便于分析计算，验证实验过程中要求线段 L 与磁体表面 ab 连线构成的测量回路平面与转轴中线保持在同一平面上；线段 L 不要有多余的折叠。磁体的旋转角速度为ω。

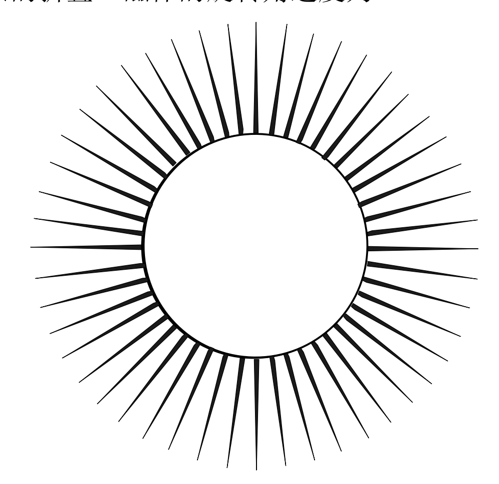


图 6　球形磁体沿磁极交界面剖开的磁体外围磁力线分布图

Fig. 6 The section view of the magnetic field line distribution around the spherical magnet (cut open along the interface between its magnetic poles)

（1）将线段 L 与磁体拉开一适当距离并保持不变。a、b 两触点由赤道中线开始分别上下缓慢移动，随着 a、b 两触点距离的拉开，示波器 O 上开始显示有正弦波电动势，并且正弦波幅值随 a、b 两点的距离增大而增大，直到 a、b 两触点分别移至上、下转轴。反之亦然。正弦波正、负峰值出现的时刻对应着磁极顶点与测量回路平面重合的时刻。

对于（1）组步骤的实验观察结果 s、m 观点及法拉第电磁感应定律均可以单独给出比较合理的解释，这里就不再说明。

（2）将 a、b 两触点拉开适当距离并保持不变。当线段 L 逐渐远离磁体时，正弦波幅值也随之逐渐减小,反之 L 越靠近磁体，正弦波幅值越大，直至 L 无限接近磁体。

m 观点：线段 L 切割磁极前面密度沿纬线正态分布随磁体旋转的磁力线，面对 N 极与 S 极时切割的磁力线方向相反，所以感应的是正弦波电动势。a、b 两触点上下距离越大，线段 L 在面对磁极相同位置时单位时间内切割的磁力线就越多，所以正弦波电动势的幅值随 ab 距离的增大而增大。反之亦然。由于磁极顶点位置的磁力线密度最大，所以正弦波的峰值出现在线段 L 与磁极顶点正对、距离最近的时刻。由图 6 可知，线段 L 离磁体越远，磁体转到相同位置时单位时间内被切割的磁力线数量会越少，所以感应的正弦波电动势幅值就越小。反之亦然。测量回路中的感应电动势可由下式确定：

$$e = \mathrm{E}\sin\omega t \qquad (2)$$

式中 E 为幅值，由下式确定：

$$\mathrm{E} = \int_0^l (V \times B) \cdot d\,l \qquad (3)$$

式中 l 为线段 L 的长度；V 为线元 dl 相对于磁力线的线速度；B 为磁极顶点与 ab 连线重合

时线段 L 上的平均最大磁感应强度。

对于正弦波电动势的幅值会随线段 L 靠近磁体增大、远离磁体减小的实验结果，若单独用 s 观点或单独用法拉第电磁感应定律都无法给出合理的解释，需要两者合结合才能给出勉强的解释：首先根据对单极感应实验结果的分析，s 观点认为在磁体旋转方向不变时，磁体磁极表面导体切割磁力线感应了直流电动势，磁体 N 极与 S 极表面的导体就变成了直流电源。磁极表面任意两点电动势的正、负极性取决于磁体的旋转方向及导体面对磁极的极性；感应电动势数值的大小取决于导体所在位置的磁力线密度与磁体的旋转角速度。因磁体旋转方向与旋转角速度恒定，所以磁极表面导体任意选定的两点间的电动势也是恒定的。由于磁极表面的磁力线密度（磁感应强度）是正态分布的，所以磁极表面导体感应的直流电动势数值沿纬线是正态分布的。因此由 a、b 两滑动触点引入到静止的测量回路中的感应电动势为交流正弦波电动势。设该正弦波电动势为 e_{ab}，因为 L 位置的改变不会影响 e_{ab}，只要 a、b 两触点在磁体上的位置不变，e_{ab} 就是定值。再根据法拉第电磁感应定律，磁通变化在闭合的测量回路中会感应的电动势，设为 e_f。再设测量回路中的感应电动势为 e。由于 e_{ab} 与 e_f 在测量回路中为频率相同、相位相反的正弦波，所以 $e = e_{ab} - e_f$。当线段 L 远离磁体，闭合回路面积增大，磁通变化率增大，e_f 增大，因 e_{ab} 是定值，所以 e 减小。反之亦然。当 L 无限靠近磁体时 e_f 趋于零，$e = e_{ab}$。似乎也能给出解释。

接下来的验证是套筒的温升实验，图 7 是套筒温升实验原理示意图。图中 T 是一个用铜皮做成的、有一定机械强度的圆柱形套筒(也可做成球形罩，实验效果会更好）。套筒直径稍大于球形磁体直径、高度为三分之二球形磁体直径。套筒位于球形磁体的中间部位，中线与球形磁体中线重合，可单独旋转、也可与球形磁体同步旋转。

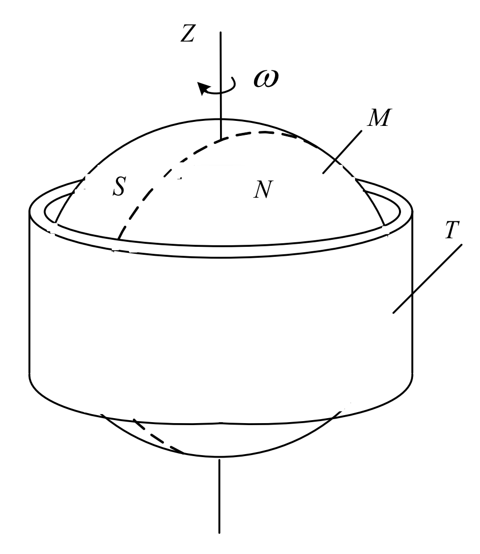


图 7　圆柱形套筒温升实验原理示意图

Fig. 7 Bipolar induction temperature rise experiment with a cylindrical sleeve

（3）套筒静止，球形磁体以恒定角速度ω旋转，数分钟后，套筒温度明显上升。

m 观点：与（1）组步骤的实验类似，不同的是这里的圆柱套筒 T 上有无数个线段 L 同

时切割磁力线，在套筒的不同部位同时感应了数值大小和方向不同的电动势，可以构成闭合通路产生环流（涡流），导致套筒温升发热。在套筒上任选两点几乎都可以测得交流正弦波电动势。

单独用 s 观点无法解释上面的实验观察结果。因此只能借助法拉第电磁感应定律给出解释：套筒 T 上有无数个闭合回路，闭合回路中因磁通变化感应交流电动势，产生涡流，导致套筒温度上升。

（4）球形磁体与套筒同步旋转，套筒没有温升。

m 观点:磁力线与套筒同步旋转，套筒与磁力线之间没有相对运动，没有切割磁力线，因此没有感应电动势，没有涡流产生。

若单独用法拉第电磁感应定律也可以给出解释：套筒上的闭合回路中没有磁通变化，没有感应电动势，因此没有涡流产生。

通过对单极感应的解释可以推知，s 观点认为随磁体同步旋转的套筒上面对 N 极与面对 S 极部位的导体切割方向相反的磁力线，感应极性相反的直流电动势，因此可以构成电流回路形成环流，套筒应该有温升，而实际情况却是否定的。

既然与磁体同步旋转的套筒 T 上没有感应电动势，说明两极感应旋转的导电磁体上也不会感应电动势。因此说明对于（2）组步骤的实验结果，单独用 s 观点或法拉第电磁感应定律都无法解释；因为 $e_{ab}=0$，所以前面用 s 观点结合法拉第电磁感应定律对（2）组步骤实验结果的解释也是错误的。可见只有 m 观点对两极感应的全部实验结果都可以给出自然合理的解释，说明两极感应实验磁体旋转时，测量回路中的电动势是由相对实验室静止的 L 线段产生的，也说明两极感应实验时磁力线是随磁体运动的。

4　结语

既然两极感应实验结果表明实验磁体的磁力线是随磁体运动的，那么图 3 的单极感应与图 5 的两极感应实验使用的是同一个磁体，只是实验时的转轴取向不同，这是否说明 m 观点是正确的，单极感应问题的答案已经明确？

磁力线随磁体运动的结论的确令人难以想象。如果确实如此，则说明运动的磁体周围并不产生电场。导致磁体（也包括直流电磁铁。但这里暂不涉及由电磁波导致的电磁作用。）的电磁感应与电磁力的真正原因是电荷与磁力线垂直分量之间的相对运动，不论是电荷相对于磁力线的运动，还是磁力线相对于电荷的运动，其结果是相同的。若再往深处思考，涉及到的问题真的很不简单。

由于笔者知识有限，给出的分析与结论未必正确，若能得到相关学者的批评指正将不胜感激。

参考文献：

[1] 张元仲. 狭义相对论实验基础[M]. 科学出版社，1979, 99-101
[2] 郭奕玲，沈慧君. 单级感应之谜[J]. 大自然探索，1988, 1：175-180
[3] FARADAY M. Faraday's diary[M]. London: Bell and Sons, 1932, Vol. 1: 402
[4] FARADAY M. Experimental researches in electricity[J]. London: Taylor and Francis, 1839, Vol. 1: 64-65
[5] FARADAY M. Phil. Trans[J]. 1852: 30

[6] WEBER W E. Ann. Phys[J]. 1841, 52: 353
[7] DJURIĆ J. Spinning magnetic fields [J]. J. Appl. Phys, 1975, 46：679-688
[8] DJURIĆ J. Reply to 'Comment on
[9] BARNETT S J. On electromagnetic induction and Relative Motion[J]. Phys. Rev, 1912, 35：323-336
[10] BARNETT S J. On electromagnetic induction [J]. Phys. Rev, 1913, 2：323-326
[11] KENNARD E H. Unipolar induction[J]. Philos. Mag, 1912, 23：937-941
[12] KENNARD E H. On unipolar induction: another experiment and its significance as evidence for the existence of the aether [J]. Philos. Mag, 1917, 33：179-190
[13] PEGRAM G B. Unipolar induction and electron theory[J]. Phys. Rev, 1917, 10: 591-600
[14] Barlett D F, Monroy J,Reeves J.Spinning magnets and Jehle's model of the electeon [J]. Phys Rev D, 1977,16:

(通讯作者：张学亮　E-mail：dqxzxl@163.com)

作者贡献声明[1]：

[1] 张学亮：提出研究思路、设计研究方案；数据的获取、提供与分析；进行实验；论文起草；论文最终版本修订。